

# 新発電技術の総合評価

## ——微粉炭火力と石炭ガス化複合発電の比較評価——

キーワード：新発電技術，総合評価，微粉炭火力，  
石炭ガス化複合発電，多属性効用理論

内 山 洋 司

### 〔要 旨〕

エネルギー問題や大型プロジェクトの技術選択問題を定量的に分析し評価することは重要ではあるが、その意思決定には多くの不確実な要因がからみ問題が複雑になっている。

多属性効用理論を用いた多目標意思決定分析は、現代の複雑な技術社会から発生する諸問題を解決するために、近年急速な開発が進められているシステム分析法である。

本報告は、多属性効用理論を計算機で使用できるようにプログラム化し、そのケーススタディとして、石炭ガス化複合発電と微粉炭火力についてその総合評価を試みたものである。

- |           |             |
|-----------|-------------|
| 1. はじめに   | 〔2〕 実現性     |
| 2. 評価対象技術 | 〔3〕 プラント運用性 |
| 3. 評価方法   | 〔4〕 環境特性    |
| 3.1 概 要   | 〔5〕 波及効果    |
| 3.2 評価項目  | 4. 評価結果     |
| 〔1〕 経済性   | 5. おわりに     |

## 1. はじめに

現在、数多く開発されている新エネルギー技術の開発優先順位を定量的に分析し評価することは重要なことであるが、検討困難な問題である。一般に今日の技術開発の選択目標には、経済的な優位性や開発の容易さのみならず、設備の安全性や環境影響の最小化といった多次元の価値観が含まれている。そして、評価においては経済性のような定量化し易い指標の他に、安全性や環境影響といった本来定量化し難い指標も含めて総合的に判断することが必要になってきている。

本研究では、こういった多目的な意思決定問題を総合的に分析する方法として最近注目されている多属性効用理論を用いて、新発電技術の総合評価を試みた。この方法は、現代の複雑な技術社会が生み出した諸問題を定量的に取扱うシステム分析法の一つであって、多目標の意思決定問題を解決する有力な方法の一つである。評価は、評価対象に選ばれた代替案に対し、単に総合的な優先順位を決めるだけでなく、問題複合体としての評価対象の複雑な構造の個々の成分に至るまで、互いに満足度を比較することが可能になるものである。

評価された技術は、噴流床方式の石炭ガス化

複合発電で、比較のため微粉炭火力が参照技術として選ばれている。石炭ガス化複合発電は石炭を利用した新発電方式の中でも特に環境特性に優れた技術であると同時に、複合発電方式による高効率から将来経済的にも有利な技術として期待されているものである。

ところで、昭和 30 年から 40 年代にかけて我が国では、数多くの火力設備が建設された。現在それらの設備の多くは法定耐用期間を終え、今後は順次休止あるいは廃止の対象になりつつある。今後、わが国の電力供給は原子力発電を基幹とし、それに次ぐ火力電源として石炭の利用拡大が検討されている。したがって、新規立地はもとより上述の既設立地点における代替設備として石炭火力の導入は欠かせず、供給技術の方式選定を評価しておくことは重要なことである。

本研究は、既設立地における代替石炭火力として、発電出力 500 MW 程度の中小容量石炭ガス化複合発電の実用化を意図し、その総合評価を多属性効用理論を用いて現用の微粉炭火力との競合関係を比較評価したものである。噴流床石炭ガス化複合発電には、ガス化炉、ガス精製、ガスタービン等の主要機器に対して各種方式が提案されているが、ここでは、1990 年代実用化を前提に、比較的实现性の高い湿式ガス精製、1,300°C ガスタービンを採用し、それを基にプラントのシステム構成を想定した。

## 2. 評価対象技術

噴流床方式の石炭ガス化炉を用いた複合発電は、固定床、流動床あるいは熔融床のガス化炉に比べ負荷変動性および炭種適合性に優れていることから、発電用に適した技術として現在開発が進められている。これに対し、既存の技術

である微粉炭火力は、大容量、都市遠隔立地である、その発電コストも原子力発電の経済性に迫りつつある。そのため同じ石炭を燃料とする発電プラントとして、石炭ガス化複合発電が今後広く普及していくためには、微粉炭火力と経済的に競合することはもちろん、その優れた環境特性を生かし立地可能な地点を探していく必要がある。

本研究の対象技術は、環境規制が比較的厳しい都市近郊に港岸リプレース用技術として立地されるものを考えており、このことから発電容量は 500 MW 程度のものである。また、導入時期を今から約 10 年後と考えると、ガス精製方式は湿式、ガスタービンは 1,300°C 級シンプルガスタービンを想定した。検討した石炭ガス化複合発電方式は、次に示す方式である。

(システム I)

ドライフィード、空気吹き、加圧 2 段噴流床湿式ガス精製、1,300°C 級ガスタービン

(システム II)

スラリーフィード、酸素吹き、加圧 1 段噴流床、湿式ガス精製、1,300°C 級ガスタービン

これに対し、比較対象として次に示す在来型の微粉炭火力を参照技術においた。

超臨界圧貫流型 346 ata 538/566°C

これら対象技術の発電出力、熱効率、建設費およびプラントのシステム構成を表 2.1<sup>1)</sup> に示す。

1) 電力中央研究所 内部資料：No. 284005 (昭和 59 年 11 月)

表 2.1 評価対象技術

対象技術	発電出力【MW】	熱効率【%】	建設費	プラント系列構成
石炭ガス化複合発電	システムⅠ (発電端) 538 (送電端) 500	(発電端) 44.7 (送電端) 41.6	1252億円 23.27万円/kW	
	システムⅡ (発電端) 577 (送電端) 500	(発電端) 45.1 (送電端) 39.1	1441億円 24.97万円/kW	
微粉炭火力	(発電端) 545 (送電端) 500	(発電端) 40.1 (送電端) 36.8	1185億円 23.70万円/kW	

: ガス化炉    : ガスクーラー    : ガスタービン    : 排熱回収ボイラ  
 : ボイラ    : 酸素プラント    : ガス精製装置    : 蒸気タービン

### 3. 評価方法

#### 3.1 概要

不確実性の時代では、責任ある意思決定者は種々の選択肢（代替案）をいろいろな選択基準（目標、属性）から総合的に判断し意思決定を下さねばならない。多属性効用関数法（MUF法）とは、こういった多目標意思決定問題に含まれる解析的局面と判断的局面のなかで、とくに判断的局面に焦点をしばって、質の異なる要因やトレード・オフ（二律背反）の関係にある要因を、効用理論により統合化して定量的に評価するものである。

この手法による評価プロセスと主な作業は、次に示す4ステップから成り立っている。

- 問題の構造化（代替案の分類、目標の設定と構造化）

- 代替案の属性分析（属性の定量化、不確実性の評価）
- 価値構造の定式化（属性の効用範囲、効用関数の定式化、価値のトレード・オフ）
- 代替案の比較評価（代替案の解析計算、感度解析）

評価対象となる代替案とは本研究では、石炭ガス化複合と微粉炭火力である。各代替案に共通した目標の設定は、いわゆる評価項目の選定である。この場合、評価項目（属性）は各代替案の優位性を明確に区別できる定量的な指標でなければならない。また、それぞれが独立に評価の対象として扱うことができないことから、評価項目には次に示すような独立性に関する仮定がおかれている。

#### (a) 効用独立

属性  $x_i$  が他の属性に対して効用独立である

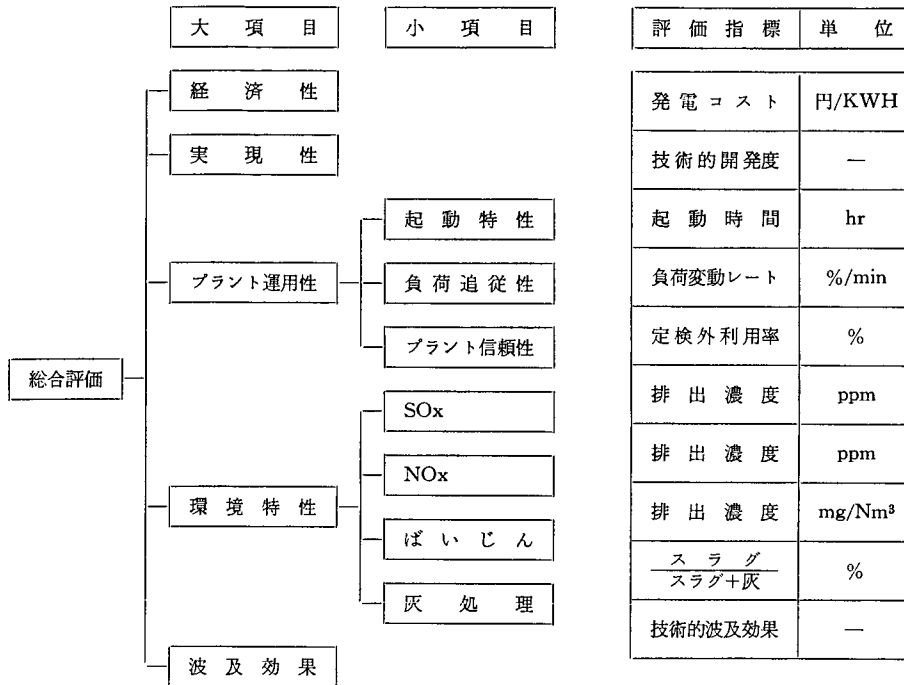


図 3.1 評価項目の階層構造

ためには、 $x_i$  のくじ (Lottery) に対する選好が、 $x_j$  の水準に依存しないことをいう。

(b) 選好独立

属性集合  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $n \geq 3$ ) において、 $X$  に含まれる任意の 2 つの属性による集合  $\{x_i, x_j\}$  の選好が、他の属性の水準に依存しない場合、属性  $x_i, x_j$  は他の属性の集合から選好独立であるという。

選定された評価項目は、同時に問題複合体として、階層的に構造化される必要がある。多属性効用理論で用いられている階層構造は、デシジョン 트리法で、重層構造 (layer) によるものである。一般に重層構造における上位のシステムは、下位のシステムに比べ、次のような特徴<sup>2)</sup>を持っている。

- より広範囲で長期的な局面の問題
- 環境や政策の状況変化に対して敏速な適応が難しい

- 問題の記述により多くの不確実性を含み、数量的定式化が困難であり構造化されにくい

問題の構造化において上位のシステムは、意思決定における調整的・総合的な機能を有していることから、その決定には慎重な判断が必要である。

図 3.1 は、本研究で用いられた評価項目を階層構造で表わしたものである。発電所建設において電気事業がまず第 1 に考えることは、供給コストの低減という政策目標の立場から、建設される発電プラントの経済性であろう。すなわち、より安価な発電コストで電力供給を賄える発電方式の選定は電気事業にとって重要なことである。ここで評価している発電プラントの経済性とは、開発目標となっている実用プラント

2) 瀬尾美己子著「多目標評価と意思決定」日本評論社、(1984 年)

の設計仕様に基づいて計算される発電コストの値であって、計算に使用される熱効率、建設費などの値は全て設計値である。

発電所が都市近郊に建設されるとき、周辺地域に及ぼす環境影響は大きな問題であり、場合によってはこれが原因となって建設が中止させられることもある。特に発電プラントが石炭火力の場合は、大気汚染物質の排出濃度や石炭灰の処理・取扱いが実際の立地の際に問題となる。

中小容量規模の石炭火力は将来の電源運用において中間負荷での運転を余儀無くされる可能性があり、今後建設される発電プラントは運転特性の優れた方式であることが好ましい。プラント運用性は、発電方式の選定における基準の一つであり、中でも起動特性、負荷追従性およびプラント信頼性は性能評価の重要な指標になる。

石炭ガス化複合発電は、現在開発途上にある技術である。1990年代に実用プラントを導入する計画を立てたとき、その技術を完成させるためには、今から商用化までにいくつかの技術開発課題に取り組み、それらを実証しておく必要がある。この場合、実際に技術を導入する立場にある電気事業にとっては、研究開発に伴う開発上のリスクは無視できない問題である。

これに対し、石炭ガス化技術はアンモニア、メタノール等原料生産技術として有用な技術であり、また将来  $C_1$  化学の発達に伴って  $CO$  ガスの需要が増えたとき、それに対処できる技術として大きな波及効果が期待できる。また、高効率ガスタービンは、蒸気タービンと組み合わせることにより電力変換総合効率を大幅に向上させ、その研究開発は、将来逼迫することが考

えられる石炭だけでなく他の化石燃料資源を有効に使う上でも大切なことである。このように石炭ガス化複合発電の開発には、他の分野への技術的波及効果の他にエネルギー有効利用の立場から見た開発意義がある。

本研究では、電気事業の立場から石炭ガス化複合発電の総合評価を客観的にとらえ、評価項目は、大項目として経済性、実現性、プラント運用性、環境特性および波及効果の5項目から構成されている。このうち、プラント運用性と環境特性は、さらに具体的かつ定量化し易い下部階層である小項目に分かれている。各評価項目には具体的な評価指標が対応しており、それぞれに効用関数が決められ、代替案に対する値が見積もられている。

評価項目の重要度は、互いにトレード・オフ関係がわかっている場合は効用の等しい無差別点となる組み合わせを決めればプログラムで自動的に計算できるが、評価項目相互にトレード・オフ関係がない場合は任意に決める必要がある。前者のトレード・オフ関係が成り立つ場合は、全体の多属性効用関数形  $U(X)$  は乗法型になり次式の関係が成り立つ。

$$1+K \cdot U(X) = \prod_1^n \{1+K \cdot k_j u_j(x_j)\};$$

$$\sum_1^n k_j \neq 1$$

$K$ : 係数

$k_j$ : 各評価項目のスケーリング定数

$u_j(x_j)$ : 各評価項目の効用関数形

$x_j$ : 各評価項目の定量指標

$n$ : 評価項目の数

これに対し、後者のようなトレード・オフ関係がない場合は、全体の多属性効用関数形は加法型になり次式の関係が成り立つ。

$$U(X) = \sum_1^n k_j u_j(x_j); \sum_1^n k_j = 1$$

本研究の評価項目は、どちらかというと後者の場合に相当しており、重要度の評価は定性的に判断せざるを得ない。ここでは、重要度を簡単に定量化する方法として便利な階層分析法 (Analytical Hierarchy Process)<sup>3)</sup> を用いた。これは各評価項目  $z_i$  ( $i=1, \dots, q$ ) について対一の比較をそれぞれの組合せすべてについて行い、相対的な評点  $d_{ij}$  を決め、それを基に、各評価項目の重要度を求める方法である。評点の決め方としては、表 3.1 に示すような 9 段階評

表 3.1 相対的な評点の決め方

相対評点 ( $d_{ij}$ )	定 義
1	有為差がなく同等と判断される場合
3	やや良いと判断される場合
5	かなり良いと判断される場合
7	極めて良いと判断される場合
9	決定的に良いと判断される場合
2, 4, 6, 8	2つの評価の中間のケース

価が使われた。評価を 9 段階に分けるのは、人間が同時に類別できる範囲が  $7 \pm 2$  水準程度でしか行えないという事実を背景にしている。各評価項目の相対評点が決まると、次に示すような各評価項目の重要度  $w_i$  ( $i=1, \dots, q$ ) の行列  $D$  を作成することができる。

$D$	$z_1$	$z_2$	$\dots$	$z_q$
$z_1$	1	$\frac{w_1}{w_2}$	$\dots$	$\frac{w_1}{w_q}$
$z_2$	$\frac{w_2}{w_1}$	1	$\dots$	$\frac{w_2}{w_q}$
$\vdots$	$\dots$	$\dots$	$\ddots$	$\dots$
$z_q$	$\frac{w_q}{w_1}$	$\frac{w_q}{w_2}$	$\dots$	1

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1q} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2q} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ d_{q1} & d_{q2} & \dots & d_{qq} \end{bmatrix}$$

ただし、

$$d_{ij} = \frac{1}{d_{ji}}$$

行列  $D$  に重要度ベクトル  $w = [w_1, w_2, \dots, w_q]^T$  を右から掛けると次のようになる。

$$Dw = \begin{bmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_q} \\ \frac{w_2}{w_1} & 1 & \dots & \frac{w_2}{w_q} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \frac{w_q}{w_1} & \frac{w_q}{w_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_q \end{bmatrix} = q \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_q \end{bmatrix} = qw$$

すなわち

$$(D - qI)w = 0 \tag{1}$$

となる。(1) 式の  $w$  に対する固有ベクトルを最大固有値に対して求め、それを正規化すると、各評価項目の重要度を計算することができる。

### 3.2 評価項目

ここでは、本研究で用いられている評価項目について、定量的な評価指標と効用関数および代替案の値をそれぞれについて求めている。評価項目は、図 3.1 で示した階層構造を持っており、それぞれの項目について定量的な評価指標が対応している。

効用関数の形と効用範囲は、それぞれの評価項目の特性に応じて作成される。一般にリスク

3) Thomas L. Saaty, "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures", J. of Mathematical Psychology, 15, 234-281 (1977).

評価を行う場合、意思決定者のリスクに対する態度が、リスク回避、中立、あるいは受容によって効用関数形は異なり、図 3.2 のような関係が成り立つ。

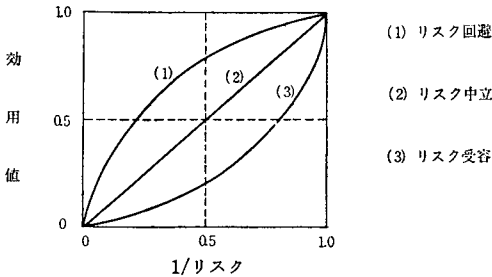


図 3.2 効用関数形

図の中で、どの効用関数が選ばれるかは意思決定者の判断により決められるものである。

評価対象となっている石炭ガス化複合発電（システム I、システム II）と微粉炭火力の各評価項目に対する推定値を表 3.2 に示す。表の値は、各評価項目を具体的な評価指標で表わし、それぞれについて対象技術の取り得る値を評価して決めたものである。

評価項目の具体的な分析方法と効用関数形を次に示すことにする。

[1]. 経済性

A. 前提条件

各発電プラントの発電コストを計算するにあたって用いられた前提条件を示すと以下のようになる。

◦ 燃料価格と燃料発熱量

計算に用いた燃料価格は一般炭の CIF 価格 12,109 円/トン（1983 年 11 月）の値に運炭、灰捨て等のデメリット費用 3,000 円/トンを加算した 15,109 円/トンである。

石炭の発熱量は炭種により大きく変わる。計算に使われた発熱量は、現在燃料用一般炭として使用されている各種石炭のうち、灰溶融温度および燃料比がほぼ中間的な値を占めているエルメロ炭であり、その発熱量 6,570 kcal/kg（恒湿炭高位）を採用した。これによると、カロリー単価は 1.30 円/1,000 kcal となる。

◦ 年経費率と設備利用率

発電コストは初年度発電コストで、その計算は建設費に年経費率を乗ずることで求める簡易法を用いている。火力発電プラントに対する年経費率は、一般に表 3.3 に示すような値がとられている。

表 3.2 評価発電方式の評価値

評価項目	評価指標	単位	石炭ガス化複合発電		微粉炭火力
			システム I	システム II	
経済性	発電コスト	円/KWH	12.73	14.21	13.36
実現性	総合開発度	—	0.142	0.554	1.00
運転用性	起動特性	起動時間	13	29	8
	負荷追従性	負荷変動率	2	1	4
	プラント信頼性	定検外利用可能率	86.9	87.0	87.5
環境特性	SO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub> 排出濃度	10	10	100
	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> 排出濃度	10	20	60
	ばいじん	ばいじん排出濃度	3.5	3.5	10
	灰処理	スラグ比率	100	75	0
波及効果	貢献度	—	0.75	0.75	0.15

表 3.3 火力発電プラントの年経費率

資本費	金利	8.0%
	減価償却	6.0% (15年定額法10%残存)
	固定資産税	1.4%
	諸費	1.18%
	小計	16.58%
直接費	給料手当	0.30%
	修繕費	0.47%
	諸費	1.35%
	小計	2.12%
関連費	事業分担費	0.17%
	事業税	0.03%
	小計	0.20%
合計		18.9%

発電コストの値は、プラントが一年間に平均してどの程度運転されたかを示す設備利用率の値によって異なり、各種発電技術の発電コストを比較するには、同一の設備利用率で計算する必要がある。本研究では設備利用率の値を70%として、発電コストを算定している。

#### B. 計算方法

発電コストは、発電に要したすべての費用を発電々力量で割ることにより算出できる。発電々力は、発電端と送電端とにおける値があるが、発電プラントの正味の経済性を評価するには送電端の電力量を使用することが好ましい。

いま、発電に必要な年間費用をTC、そのときの年間発電々力量をEとすると、年間の発電コストCOEは次式で表わされる。

$$COE[\text{円/kWh}] = TC[\text{円}] / E[\text{kWh}]$$

ここで、分母の発電々力量は、送電端における供給電力量となることから、その値は次式から算定できる。

$$E[\text{kWh}] = P \times \left(1 - \frac{a}{100}\right) \times \frac{CF}{100} \times 8,760$$

$P$  : 認可最大出力 [kW]

$a$  : 所内比率 [%]

$CF$  : 設備利用率 [%]

上式で表わされる送電端の発電々力量は、一年間の計画および計画外停止電力と所内動力用として消費された電力を差し引いた正味の供給能力に相当したものである。

発電コストの計算式で示される分子の値TCは、一年間の発電のために要する直接および間接のすべての費用を含むものである。その費用に初年度の値を用いて発電コストを算定すると、それは初年度発電コストになる。初年度に必要な年間費用を求める方法には、詳細に積上げる方法があるが、それとは別に年平均経費率を用いて建設費から算定する簡易法がある。ここでは、この簡易法を用いて初年度発電コストを算定している。

$$COE_1 = C_1 + C_2 + C_3$$

$COE_1$  : 初年度発電コスト [円/kWh]

$C_1$  : 固定費 [円/kWh] =  $\frac{\text{建設単価} \times \text{年経費率}}{8,760 \times \text{設備利用率}}$

(注) 建設単価は送電端電気出力に対する値

$C_2$  : 燃料費 [円/kWh]

$$= \frac{0.86 \times \text{燃料単価}}{\text{燃料発熱量} \times \text{送電端効率} \times \text{効率補正係数}}$$

(注) 効率補正定数は、定格効率を年平均効率にするときの係数で0.96を用いている。

$C_3$  : ユーティリティー費 [円/kWh]

#### C. 計算結果と効用関数

表3.4は石炭の燃料価格が15,109円/トンで計算したときの初年度発電コストを各対象技術について示したものである。

表で湾岸リプレースの石炭火力発電の発電コストをみると、13~14円/kWh程度の値であることがわかる。この値は、2,000MWe級の大容量石炭火力発電の発電コストの値かそれ以



表 3.4 対象技術の初年度発電コスト

項 目	石炭ガス化複合発電		微粉炭火力	
	システム I	システム II		
送電端出力 [MW]	500	500	500	
建設単価 [万円/kW]	25.04	28.82	23.07	
発電コスト	固 定 費	7.72	8.88	7.30
	燃 料 費	4.95	5.27	5.60
	コーティリティ費	0.06	0.06	0.46
	円/kWh	12.73	14.21	13.36

下のもので、現在の原子力発電の発電コストに対しても充分競合できる値である。これは老朽火力発電の代替技術に石炭火力発電を利用した場合、港湾設備費が省略でき建設費を大幅に低減できる可能性があるためである。また、表の値は、老朽火力の代替技術において、環境特性の優れた石炭ガス化複合発電が中小容量の微粉炭火力発電に比べ経済的にも充分競合していることを示している。

経済性を表わす効用関数は、発電コストの値が原子力発電の値より安いときを効用 1 とし、既設石油・LNG 火力の燃料費より高いときを 0 とし、図 3.3 のように表わした。

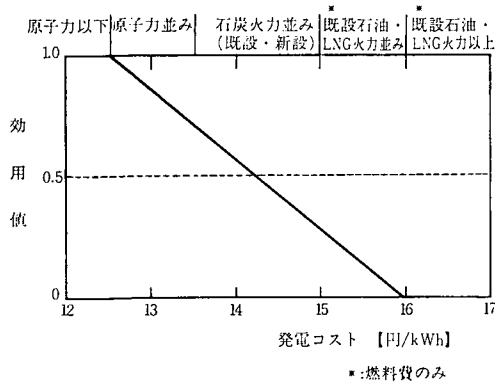


図 3.3 経済性の効用関数

[2]. 実 現 性

実現性とは、現在の開発達成レベルから目標

とする実用プラントが商用化されるまでの技術開発上の難しさを意味し、開発リスクに相当したものである。開発の難しさには、技術的・資金のおよび体制的な面から見た難しさが考えられるが、ここでは技術的側面から見た開発の難易度をもってそれを表わすことにする。

石炭ガス化複合発電の技術は我が国では開発途上にある技術で、現在パイロットプラント建設のフェージビリティ・スタディが行われている段階にある。このことから商用化されるまでには、いくつかの技術開発課題がある。本研究で対象となっている方式について主な開発課題をガス化炉、ガス精製、ガスタービンについてあげると次のようになる。

(1) ガス化炉

- 石炭供給方式としてドライフィードとスラリーフィードがあるが、技術的信頼性および安全性の実証が課題となっている。
- 空気あるいは酸素をガス化剤として使う方法がある。空気吹きの場合、低カロリー石炭の燃焼には酸素富化法が考えられる。
- 熱回収における炉内伝熱管およびスーパーヒータの材料腐食が問題となる可能性がある。ガス化炉の大型化に対しては、炉構造、支持構造、炉廻り補機等の性能を検討する必要があるとともに炉本体（耐圧部、耐火材）の材料選定も重要な課題である。

(2) ガス精製

湿式の場合は高性能ガス熱交換器の開発が必要となる。

(3) ガスタービン

低カロリーガスに対する低 NO<sub>x</sub> 高温燃焼器、圧縮機性能向上技術およびタービン性能劣化対策技術が主な開発課題である。

技術開発課題の開発度を評価する方法とし

て、ここでは簡易評価法を用いることにする。これは、各開発課題の特性を表 3.5 のような構造、機能および材料の 3 つの因子で分類し、それぞれの課題について、実証済み、一部実証済み、未開発のどの段階に属しているかを評価する方法である。また、それを定量化させるため

にそれぞれの開発度を表のような数値で表わしている。

表 3.6 は、表 3.5 の評価マトリックスに従って各方式の技術開発課題の開発度をそれぞれ評価したものである。また表の下には、ガス化複合発電のシステム I と II について計算によっ

表 3.5 技術開発課題の開発度評価法

- 要素技術課題毎の開発度  $P_i = P_S \times P_F \times P_M$
- 総合開発度  $P = \prod_1^n P_i$

課題の特性分類 開発段階	構造因子* (S : 0.9)	機能因子** (F : 0.80)	材料因子 (M : 0.7)
実証済み (A : 1.0)	方式の実証は終わっているが、若干改良の余地がある (0.9)	他分野では既の実証されている方式で改良すれば使うことができる (0.80)	市販材料でよいが初めての適用 (0.7)
一部実証済み (B : 0.95)	方式の実証は一部終了しているが、利用までにはかなりの構造的な開発が必要 (0.855)	他分野で一部実証されているが応用するまでにはかなりの改良が必要 (0.76)	市販材料を改良すれば開発可能 (0.675)
未開発 (C : 0.9)	方式の基礎研究は終わって現在応用研究の段階にある (0.81)	まだ未開発の方式で基礎研究段階にあり、質的設計改良が必要 (0.72)	新材料の開発を要する (0.63)

\* その課題を解決する手段として、明確な方法が既があり、それに関する量的（大型化）な研究開発を行えばよい。  
 \*\* その課題を解決するためには、新しい原理、概念による質的設計改良が必要になる。

表 3.6 石炭ガス化複合発電の技術開発課題の分類と評価

開発要素の分類		開発課題	評価			開発度
			構造	機能	材料	
石炭供給方式	ドライフィード (システム I)	連続安定供給	B	—	—	0.855
	スラリーフィード (システム II)	高濃度スラリー供給	A	—	—	0.9
ガス化炉	耐火壁 (システム I) (システム II)	灰融点降下技術	B	—	—	0.855
		バーナーの改良	A	—	—	0.9
	2 段水冷壁 (システム I)	耐圧炉壁構造	A	—	—	0.9
		大容量炉のバーナー配置 溶融スラグ取出し技術	B B	— —	— —	0.855 0.855
ガス精製	湿式 (システム I, II)	高性能ガス熱交換器	A	—	—	0.9
ガスタービン	圧縮機 (システム I, II) 燃焼機 (システム I)	高圧力比圧縮機低 カロリー燃焼器	A —	— B	— A	0.9 0.532
		タービン翼空冷 (システム I, II)	高温・耐食及び付着対策技術	B	A	—

システム	要素技術の開発度				総合開発度
	石炭供給系	ガス化炉	ガス精製	ガスタービン	
I	0.855	0.563	0.9	0.327	0.142
II	0.9	0.9	0.9	0.616	0.554

て得られた要素技術の開発度と総合開発度を示している。

総合開発度に対する効用関数の形は、開発度1(=100%)を効用値1とし、開発度0(=0%)を効用値0としてその間を直線で結んだ。微粉炭火力の開発度は1とした。

[3]. プラント運用性

実際にプラントが運用されたときに想定されるプラントの運転および保守上の性能特性をいう。各評価項目は互いに独立していなければならないことから、実現性の定義で定めた技術的な開発度の中には運用上の技術開発課題は含まれていない。

プラント運用性はさらに起動特性、負荷変動特性およびプラント信頼性に分けて評価している。

(1) 起動特性

起動特性を表わす指標に起動時間を選んだ。これは冷機時間(酸素プラント起動開始からガス化炉を暖機してプラントが定格出力に達するまでの時間)である。

石炭ガス化複合発電の起動時間は微粉炭火力に比べ同程度の性能を有しているといわれているが、酸素吹きの場合、酸素プラントの起動に時間がかかるため全体時間はやや長くなる。

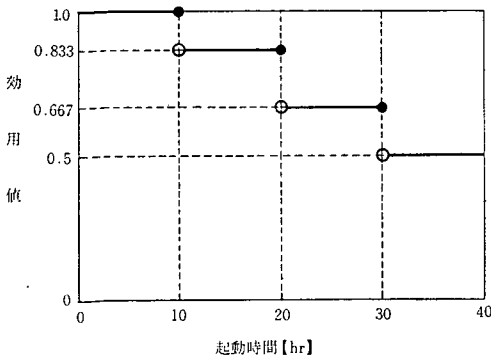


図 3.4 起動力特性の効用関数

各発電方式の起動時間は次のように推定された。

- (システム I) 13 時間
- (システム II) 31 時間
- (微粉炭火力) 8 時間

起動時間に関する効用関数は、微粉炭火力の起動時間を効用値1として図3.4のように表わした。

(2) 負荷変動特性

プラントの負荷変動特性は、一般に負荷変化率によって表わされる。最新鋭の火力発電所の負荷変化率は約5%/min程度であり、通常の微粉炭火力の場合4%/min程度の値である。ガス化複合は、制約因子にガス化剤の供給系、酸素プラント、蒸気タービン等が考えられ、微粉炭火力に比べシステムが複雑である。このため負荷変化率は微粉炭火力に比べ若干劣り、空気吹きで約2%/min、酸素吹きで1%/min程度となっている。

負荷変化率に対する効用関数は、最新鋭火力の値5%/minを効用値1とし図3.5のように表わした。

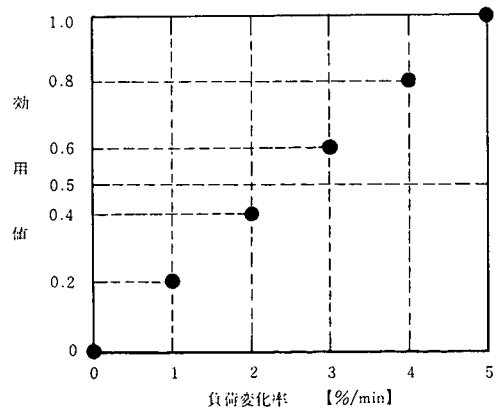


図 3.5 負荷変動特性の効用関数

## (3) プラント信頼性

信頼性には、故障しないような製品にする狭義の信頼性、故障したものを正常な機能に回復させる保全性、それに故障によって人間や資材に損害を与えないようにする安全性の問題がある。このうち安全性は、人間や資材に損害を与える潜在的な状態（ハザード）の程度と発生確率の大小で評価されるが、その試験や測定は困難であることから通常は定性的な評価点で表わすことが多い。これに対し、信頼性と保全性の尺度は、JIS (Z 8115) に規定されており、一般に両者を考慮した信頼性尺度は稼働率 (Availability) で表わされる。

発電プラントの信頼性の尺度である稼働率は、時間稼働率 (A) であり、次式で表わすことができる。

$$A = \frac{\text{プラント平均稼働時間}}{\text{プラント平均停止時間} + \text{プラント平均稼働時間}}$$

システム全体の信頼性は、プラントを構成する各々の機器の信頼性に依存しており、プラント全体の稼働率は、主要構成機器の積になり、次式で表わされる。

$$A_p = A_{s1} \times A_{s2} \times \dots \times A_{sn}$$

$A_p$  : プラント稼働率

$A_{s1,2,\dots,n}$  : 主要構成機器の稼働率

ここでは、プラント信頼性として定検外利用可能率で評価した。これは、定検を除いたプラントの設備利用率であり、主要機器の故障時間を想定して時間稼働率を算定し、プラント系列構成から考えられる負荷に対して確率的に求められるものである。式で表わすと次のようになる。

$$X = x_i A_i$$

X : 定検外利用可能率

$x_i$  :  $j$  負荷

$A_i$  :  $i$  負荷に対する定検外稼働率

$$A_i = f(A_0, A_G, A_C, A_T, A_S, A_B)$$

$A_0$  : 酸素プラントの定検外稼働率

$A_G$  : ガス化炉の定検外稼働率

$A_C$  : ガス精製装置の定検外稼働率

$A_T$  : ガスタービンの定検外稼働率

$A_S$  : 蒸気タービンの定検外稼働率

$A_B$  : ボイラーの定検外稼働率 (微粉炭火力のみ)

石炭ガス化複合発電の主な構成機器は、酸素プラント、ガス化炉、ガス精製、ガスタービンおよび蒸気タービンである (表 2.1 参照)。システム I と II, 微粉炭火力に対し、それぞれの負荷に対する定検外稼働率を求めると次のようになる。

(システム I)

$x_1$  (全負荷)

$$A_1 = A_G \times A_C \times A_T^2 \times A_S$$

$x_{1/2}$  (1/2 負荷)

$$A_{1/2} = A_G \times A_C \times 2(1 - A_T) \times A_S$$

$x_0$  (0 負荷)

$$A_0 = 1 - (A_0 + A_{1/2})$$

(システム II)

$x_1$  (全負荷)

$$A_1 = A_0^2 \times A_G^2 \times A_C \times A_T^2 \times A_S$$

$x_{1/2}$  (1/2 負荷)

$$\begin{aligned} A_{1/2} = & 2(1 - A_0) \times A_G^2 \times A_C \times A_T^2 \times A_S \\ & + A_0^2 \times 2(1 - A_G) \times A_C \times A_T^2 \times A_S \\ & + A_0^2 \times A_G^2 \times A_C \times 2(1 - A_T) \times A_S \\ & + 2(1 - A_0) \times (1 - A_G) \times A_C \times A_T^2 \\ & \quad \times A_S \\ & + 2(1 - A_0) \times (1 - A_G) \times A_C \\ & \quad \times 2(1 - A_T) \times A_S \end{aligned}$$

$x_0$  (0 負荷)  $A_0 = 1 - (A_0 + A_{1/2})$

(微粉炭火力)

$$x_1 \text{ (全負荷)} \quad A_1 = A_B \times A_C \times A_S$$

$$x_0 \text{ (0 負荷)} \quad A_0 = 1 - A_1$$

ここで、各構成機器の定検外稼働率を次のような値にすると、

$$A_0 = 0.99$$

$$A_G = 0.97 \text{ (システム I)}$$

$$0.98 \text{ (システム II)}$$

$$A_C = 0.98$$

$$A_T = 0.95$$

$$A_S = 0.96$$

$$A_B = 0.93$$

各発電方式の定検外利用可能率は次のようになる。

石炭ガス化複合	システム I	0.869
	システム II	0.870
微粉炭火力		0.875

プラント信頼性に対する効用関数形を図 3.6 に示す。

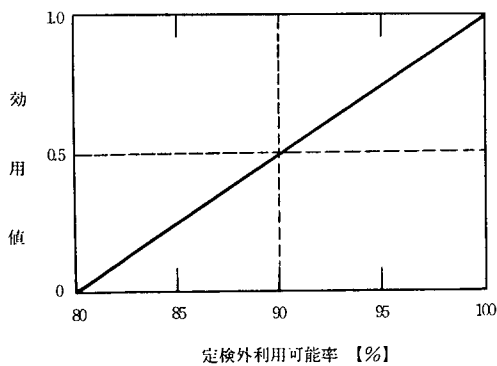


図 3.6 プラント信頼性の効用

#### [4]. 環境特性

一般に発電所の建設に伴う社会環境影響には、立地点周辺の地域社会への産業振興や雇用促進といった良い影響面と、それに対して事故や火災などによる死亡・傷害、あるいは SO<sub>x</sub>,

NO<sub>x</sub>, ばいじん等の大気汚染による疾病率の増加や植物の環境破壊などの悪い影響面もある。

本研究で評価している発電技術は石炭火力であることから、産業振興や雇用促進といった点に関しては発電方式の違いによる有為差があらわれにくいと考えられる。微粉炭火力と石炭ガス化複合発電の環境影響で特に異なる点は大気汚染問題と灰処理問題であろう。

石炭ガス化複合発電の湿式ガス精製方式は、既に石油化学工業などで開発済みの技術である。湿式法のガス精製工程は、ガスクーラーのあとに、粗脱じん、精密脱じん、脱硫の順で精製が行なわれる。精密脱じんはガスタービンが使用に耐えるばいじん濃度(約 10 mg/Nm<sup>3</sup> 以下)までに精製ガスを脱じんするもので、湿式法の場合 3.5 mg/Nm<sup>3</sup> 程度までの除去が可能である。湿式の脱硫方式は Selexol 法と呼ばれる方式を採用しており、これによると脱流率は 99% 程度まで可能であり、SO<sub>x</sub> の系外排出濃度を 10 ppm にまでおさえることができる。NO<sub>x</sub> 排出濃度は、システム I と II とで若干異なり、システム I では 10 ppm、システム II では 20 ppm 程度の値と考えられる。石炭灰の処理処分は、環境対策上大きな課題の一つである。噴流床石炭ガス化複合発電で排出される石炭灰は、粒径 3~10 mm 程度のガラス質スラグであり、スラグ中に金属イオンが取り込まれることから、外部環境への有害金属イオンの溶出が少ないことが特徴である。スラグはガス化炉内温度が 1,600°C と高いことから、システム I と II のいずれのガス化炉からも炉底から排出される。システム I の石炭灰は完全にスラグ状態であることにに対し、システム II の場合はガラス状のスラグの他にフライアッシュが主に粗脱

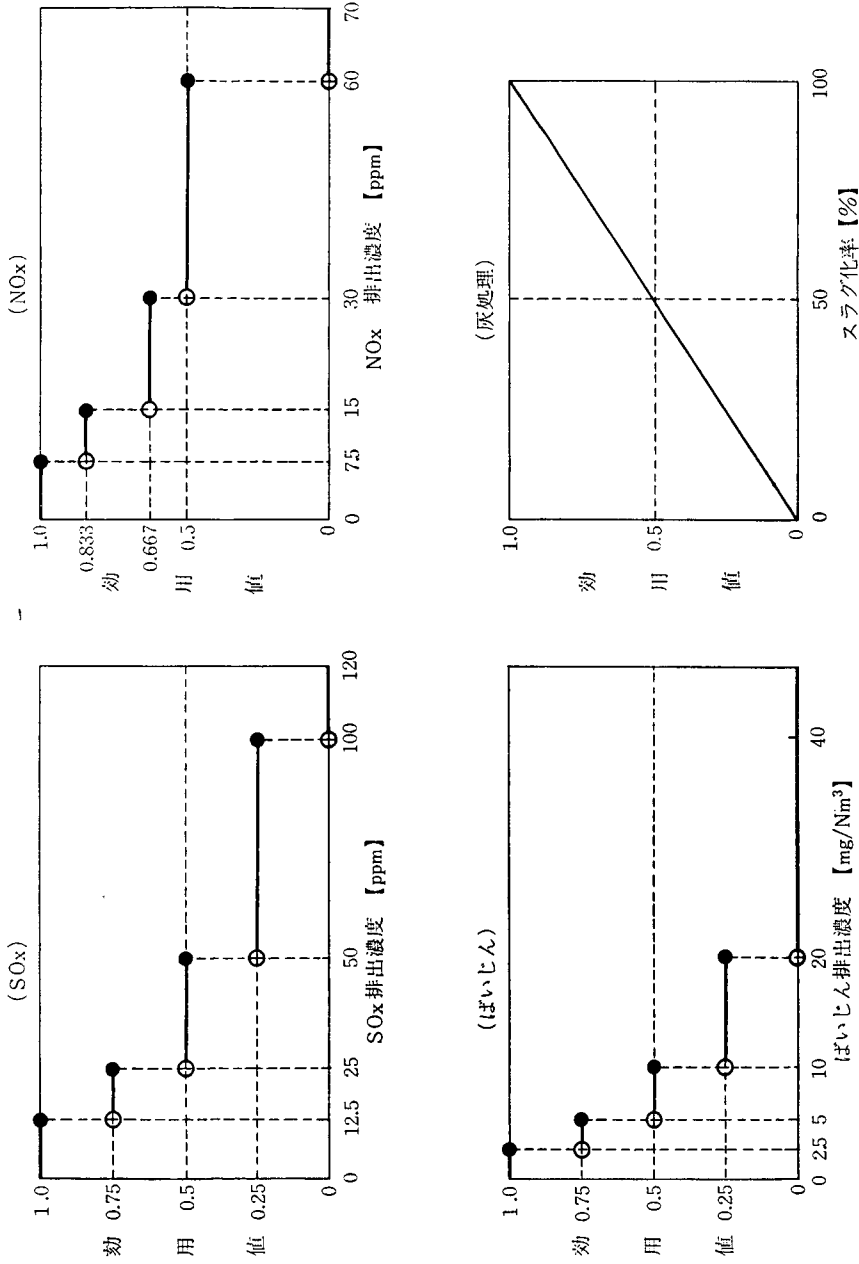


図 3.7 環境特性の効用関数

じん装置より排出されるため石炭灰のスラグ化率は 75% 程度である。

微粉炭火力の環境排出濃度は現在の環境基準で設定しており、環境設備の設計および設備費はその基準に従って算定されている。設定された環境排出基準は次のような値である。

(SO <sub>x</sub> 濃度)	100 ppm
(NO <sub>x</sub> 濃度)	60 ppm
(ばいじん濃度)	10 mg/Nm <sup>3</sup>

微粉炭火力の石炭灰は、その中にスラグ成分は含まれておらず、灰の粒径は 100 ミクロン程度のものである。

本研究で用いられた環境特性 (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじん, 灰処理) の効用関数形を図 3.7 に示す。図の中で、SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじんに関しては、環境影響の限界効用逡限を考慮してそれぞれの効用関数を作成した。

[5]. 波及効果

新技術開発には社会への導入による直接的な利益の他に、他の分野に対する間接的な利益がある。間接的な利益とは所謂波及効果であって、それには技術的、経済的および社会的側面から次に掲げるような利益がある。

- (1) 技術面 (技術開発および技術の普及により科学技術の発展や他技術の開発に貢献し得る。)
  - 欧米依存の技術蓄積過程からの脱却 (自主技術の開発)
  - 技術開発力の保持ないし養成に役立つ、国際的に対抗力のある技術になり得る
  - わが国の研究資源の有効利用
- (2) 経済面 (技術が普及することで国際収支、産業構造、経済成長等へ寄与する。)
  - 産業構造の転換をリード
  - 成長制約要因を打開できる可能性がある

- 付加価値の高い産業部門へ加速的な波及効果がある
  - 経済成長への活力を喚起できる
  - 脱石油自給率向上へ寄与できる
- (3) 社会面 (技術が普及することで社会や地域へ良い影響を与える)
- 国民の理解と合意形成に役立つ
  - 地域社会の雇用、経済の活性化に貢献する

本研究では、波及効果を科学技術の発展への寄与と産業社会への貢献度の 2 つの立場から評価した。評価はそれぞれ定性的な判断で行っており、その指標として以下に示す 5 段階評価を用いている。

[科学技術発展への寄与]

(項 目)	(評点)
①画期的な技術である	1.0
②飛躍的な技術である	0.75
③従来より進んではいるが飛躍的でない	0.50
④従来よりやや進んでいる	0.25
⑤従来技術と変わらない	0

[産業社会への貢献]

(項 目)	(評点)
①雇用エネルギー産業への貢献大	1.0
②いずれか一つに貢献大	0.75
③貢献の可能性はある	0.50
④貢献の可能性は少しある	0.25
⑤可能性なし	0

石炭ガス化複合発電の開発は、従来の蒸気サイクルや石炭の直接利用の立場と比較すると技術的には飛躍的な技術と考えられる。一方、産業社会への貢献面から見るとガス化技術はアンモニア、メタノール等原料生産用技術としての波及効果が大きく、また将来 C<sub>1</sub> 化学の発展に

伴って CO ガスの需要が増えたとき、それに  
 対処できる技術として期待できるものである。  
 こういった点を考えると、石炭ガス化複合発電  
 の開発はエネルギー産業への貢献が大きい技術  
 開発である。

これに対し、微粉炭火力は技術的な面では従  
 来技術と変わらないものであるが、産業社会に  
 対しては発電所が建設されることによる利点は  
 少しある。

波及効果の重要度を電気事業の立場にたつて  
 考えてみると、科学技術への発展よりも産業社  
 会への貢献の方がより重要な問題であろう。そ  
 こで前者と後者の重要度の比を 4 : 6 と考える  
 と、石炭ガス化複合発電の波及効果による貢献  
 度は 0.75 となり、微粉炭火力の貢献度は 0.15  
 となる。

#### 4. 評価結果

##### (1) 階層分析法による重要度計算

図 3.1 で表わされる評価項目のうち大項目の  
 各重要度を求めることにする。表 3.1 の相対的  
 な評点の決め方を参考に、経済性を重視した形  
 で一対比較を行ったものが表 4.1 の結果であ  
 る。

表 4.1 の重要度の相対比較から各評価項目の  
 重要度を算出すると次のようになる。

経済性 :  $w_1 = 0.403 (\approx 0.40)$

実現性 :  $w_2 = 0.137 (\approx 0.15)$

運用性 :  $w_3 = 0.137 (\approx 0.15)$

環境特性 :  $w_4 = 0.244 (\approx 0.20)$

波及効果 :  $w_5 = 0.079 (\approx 0.10)$

これに対し、小項目の重要度を同じような評

表 4.1 大項目の重要度評価

A	重要度の相対比較 (倍率)																B	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
経済性							+											実現性
経済性							+											運用性
経済性								+										環境特性
経済性						+												波及効果
実現性									+									運用性
実現性										+								環境特性
実現性											+							波及効果
運用性												+						環境特性
運用性													+					波及効果
環境特性																	+	波及効果
	決定的にAの方が重要	極めてAの方が重要	かなりAの方が重要	ややAの方が重要	AもBも同じ程度に重要	ややBの方が重要	かなりBの方が重要	極めてBの方が重要	決定的にBの方が重要									



価方法で求めると次のようになった。

(運用性)	(環境特性)
起 動 特 性 : 0.25	SO <sub>x</sub> : 0.2
負 荷 追 従 性 : 0.25	NO <sub>x</sub> : 0.2
信 頼 性 : 0.50	ばいじん : 0.2
	灰 処 理 : 0.4

(2) 期待効用の計算

上で得られた重要度に従って、各代替案(評価対象技術)の期待効用値を求めると次のようになる。

	期待効用値
石炭ガス化複合(システムⅠ)	0.726
微粉炭火力	0.606
石炭ガス化複合(システムⅡ)	0.572

この評価は、重要度において経済性を重視していることから、経済性の優れた石炭ガス化複合のシステムⅠが最も高い評価となっている。システムⅡの期待効用値は微粉炭火力の値と近いが、経済性面で劣っているため、わずかに微粉炭火力の方が高い評価になっている。

次に、上で得られた期待効用値を経済性の値である発電コストに換算したとき、経済性以外の評価項目の効用値がどの程度の発電コストに相当しているかを求めることにする。この計算は次式に従って得られるもので、評価者が経済外の指標をどの程度の経済性で評価しているかを理解することができるものである。

$$A = E_B + (1 - U) \frac{\Delta E}{w_1}$$

A : 期待効用値に相当する等価発電コスト

E<sub>B</sub> : 初期の発電コストの最良値

ΔE : 初期の発電コストの設定範囲

w<sub>1</sub> : 経済性の重要度

U : 代替案の期待効用値

上式から、各代替案の等価発電コストを求め

ると表4.2のようになる。

表 4.2 代替案の等価発電コスト

代 替 案	期 待 効 用 値	等価発電コスト [円/kWh]		
		経 済 性	他 の 評 価 項 目	合 計
石炭ガス化複合(システムⅠ)	0.726	12.73	2.17	14.90
微粉炭火力	0.606	13.36	2.59	15.95
石炭ガス化複合(システムⅡ)	0.572	14.21	2.03	16.24

(3) 感度解析

ここでは、各評価項目の重要度を任意に決め、その値を変化させることで、代替案の期待効用値がどのように変化するかを調べることにする。

感度解析のケースとしては、重要度等価、経済性重視、環境特性重視、および経済性・環境特性重視の4ケースを考えた。各ケースに対して設定した評価項目の重要度の値を表4.3に示す。

表 4.3 感度解析における重要度

評価項目	重要度等価	経済性重視	環境特性重視	経済性・環境特性重視
経 済 性	0.2	0.40	0.15	0.30
実 現 性	0.2	0.15	0.15	0.13
運 用 性	0.2	0.15	0.15	0.14
環 境 特 性	0.2	0.15	0.40	0.13
波及効果	0.2	0.15	0.15	0.30

表4.3の各ケースの重要度は大項目に関して変化させたものであるが、小項目に関してはどのケースの場合も等価の重要度とした。

各ケースに対する代替案の期待効用値と等価発電コストの値を求めると表4.4のようになる。

表 4.4 感度解析結果

ケース	重要度等価		経済性重視		環境特性重視		経済性・環境特性重視	
	期待効用	順位	期待効用	順位	期待効用	順位	期待効用	順位
石炭ガス化複合 (システムⅠ)	0.650 (18.63)	1	0.721 (14.94)	1	0.711 (19.24)	1	0.739 (15.55)	1
石炭ガス化複合 (システムⅡ)	0.592 (19.64)	2	0.572 (16.25)	3	0.642 (20.85)	2	0.610 (17.05)	2
微粉炭火力	0.577 (19.90)	3	0.622 (15.81)	2	0.511 (23.91)	3	0.563 (17.60)	3

( ) 内は等価発電コスト [円/kWh]

表 4.4 の結果からわかることは、どのケースにおいても経済性と環境特性に優れた石炭ガス化複合のシステムⅠが最も良く評価されていることがわかる。それに対し、システムⅡは経済性重視型ケース以外のすべてのケースで2番目になっている。このことは、総合的に判断すると石炭ガス化複合発電は、将来の老朽火力に対する代替技術として有望な発電方式であることを示している。

## 5. おわりに

本報告は、多目標問題に対する総合評価手法の紹介に力点をおいたものである。今回選択された発電プラントはモデルプラントであり、評価項目とその効用関数形も任意に重要と思われるものを選んで評価したものである。このことから、実際に石炭ガス化複合発電を導入する立場になったら、電気事業の政策および具体的な立地点によって、評価項目とその階層構造および効用関数形は今回のものと異なったものになるであろう。

多属性効用理論は、不確実性のある多目標の意思決定問題に対し、問題点を明確にし、さらに各評価項目についてそれぞれにふさわしい定量的な評価指標で分析し、それらを総合的にまとめあげるものである。こういった作業を通じ

て、意思決定者は問題全体の相互関係を理解し、その中で何がどの程度重要な問題なのかを定量的に判断できることになる。この方法は、今日のような複雑化した変動の激しい社会において、絶えず意思決定をせまられる人々への支援システムとして有用な手段である。特に、エネルギー技術の問題は、その開発期間が長い上に、研究開発費や研究者・技術者の数が巨大になるため政策判断の誤りによって生じる社会的な損失は計り知れないものである。

当所では、この方法を使い易くさせるため、パーソナルコンピュータで簡単に利用できるようにシステムを開発した。今後の課題としては新エネルギー技術の総合評価手法に本システムを利用していく予定であるが、同時に他の多目標問題に対しても、本評価システムが広く活用されることを期待している。

最後に、本報告を執筆するに当たって、対象技術についての情報を提供してくれました当所エネルギー研究所・高温材料研究室・桑原和夫室長、複合発電研究室・森塚秀人担当研究員、および評価手法のプログラム化に協力して下さいました経済研究所・数理研究室・松井正一担当研究員の各氏に深く感謝致します。

( うちやま ようじ )  
経済部  
エネルギー研究室